Über das Ansteigen der Helligkeitserregung

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der philosophischen Fakultät
der Universität Leipzig

vorgelegt von

Max Büchner

ACAD. LOUVAIN BIBL.

Mit 14 Figuren im Text

LEIPZIG
WILHELM ENGELMANN
1906

Angenommen von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Sektion
auf Grund der Gutachten der Herren Wundt und Wiener

Leipzig, den 5. XII. 1905

Der Prokanzellar
Marx

Sonderabdruck aus: Wundt's Psychol. Studien, Band II, Heft 1/2.

Inhaltsübersicht

Seite

Einleitung und Problemstellung 1
Versuchsanordnung für Dunkeladaptation 6
Resultate aus den Beobachtungen für Dunkeladaptation 10
Versuchsanordnung für Helladaptation 18
Resultate aus den Beobachtungen bei Helladaptation 20
Endergebnis 24

Einleitung und Problemstellung.

Die Frage nach dem Anstiege der Helligkeitserregung ist schon verschiedentlich behandelt worden, und zwar sind diese Untersuchungen zum Teil mit ruhenden Bildern ([1, 2, 3, 4, 5]), zum Teil mit bewegten Reizlichtern ([a, b, c]) angestellt worden. Doch wird das Hauptgewicht vielfach auf die Feststellung der Maximalzeit (d. h. derjenigen Zeit, die ein Lichtreiz braucht, um seine größte Helligkeitswirkung für das Auge hervorzubringen) und auf die Abhängigkeit dieser Maximalzeit von der Intensität gelegt. Für den Anstieg wird teils im Anschluß an das Talbotsche Gesetz ein ungefähr geradliniger Verlauf bis zum Maximum, teils eine leicht gekrümmte Kurve gefunden. Nachdem im Leipziger psychologischen Institut vor einigen Jahren eine Untersuchung über das Verhältnis der Maximalzeiten farbloser und farbiger Helligkeiten angestellt worden war, es dabei aber an Zeit fehlte, die Anstiegskurve näher zu untersuchen, stellte mir Herr Geheimrat Wundt die Aufgabe, diesen Anstieg der Helligkeitserregung näher zu verfolgen.

---

[1]) Exner, S., Über die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit. Sitz.-Berichte d. Wiener Akad. 1868.

[2]) Kunkel, A., Über die Abhängigkeit der Farbenempfindung von der Zeit. Pflügers Archiv, Bd. 9, 1874.

[3]) Martius, G., Über die Dauer der Lichtempfindungen. Beiträge zur Psychol. u. Philos. I, 3, 1902.

[4]) Dürr, E., Über das Ansteigen der Netzhauterregungen. Wundt, Phil. Studien, 18. Bd., 1903.

[5]) Mc Dougall, W., The variation of the intensity of visual sensation with the duration of the stimulus. Journal of Psychology, June 1904.

[a]) Hess, C., Untersuchungen über den Erregungsvorgang im Sehorgan. Pflügers Archiv, Bd. 101, 1904.

[b]) Mc Dougall, W., The sensations excited by a single momentary stimulation of the eye. Journal of Psychol., Jan. 1904.

[c]) Charpentier, A., Archives de physiol. normale et path. 1892, 1896; Comptes rendus de l'Acad. des sciences 1896.

Obwohl man also bereits Kurven für den Anstieg veröffentlicht und sich darüber gestritten hat, hat man dabei doch versäumt, sich über ihre wahre Bedeutung, über ihre Grundlagen und die Voraussetzungen, auf denen sie aufgebaut sind, Rechenschaft zu geben. Es fragt sich zunächst: Was kann ich beobachten?

Alle Beobachtungen über den Anstieg beruhen auf der Tatsache, daß beim Anblick einer physikalisch bestimmten Lichtintensität deren Empfindungsintensität (Helligkeit) sich ändert mit der Dauer der Betrachtung. Daraus folgt sofort die Möglichkeit, daß zwei physikalisch

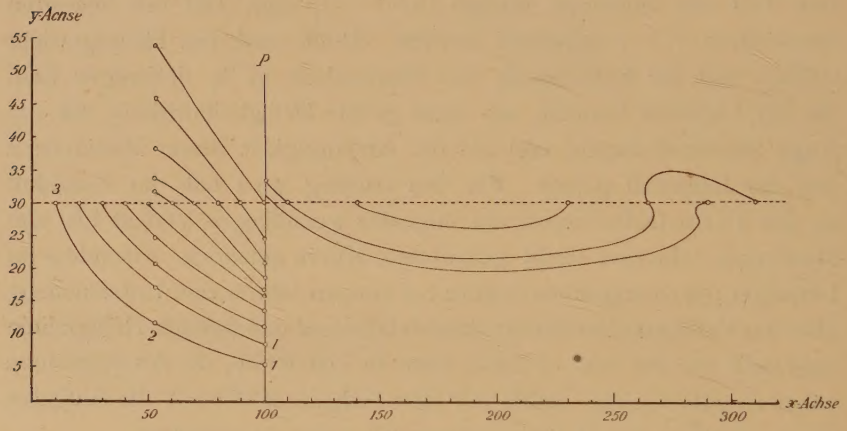

Fig. 1.

verschiedene Lichtintensitäten in der Empfindung als gleich erscheinen können, wenn ihre verschiedene Dauer richtig bemessen ist. Die Probe überzeugt uns, daß diese Möglichkeit zur Wirklichkeit wird, und alle meine Beobachtungen beruhen auf solchen Angleichungen. Trage ich diese Beobachtungen in ein Koordinatensystem ein, die Zeiten etwa als x-Koordinaten, die Intensitäten als y-Koordinaten, so erhalte ich z. B. folgendes: Fig. 1.

Die Empfindungsintensität (-Helligkeit) ist dieselbe bei
der Intensität i_1 und der Dauer t_1 (Punkt 1)
wie bei » » i_2 » » » t_2 (Punkt 2) oder
» » » » i_3 » » » t_3 (Punkt 3)
usw. usw. usw.

Ein solches System unendlich vieler Gleichungen, d. h. die Gesamtheit aller dieser Punkte, wird in der xy-Ebene eine Kurve bilden, eine Linie gleicher Helligkeit (L. gl. H.).

Ich nehme nun einen andern Punkt I, der etwa dieselbe Zeit t_1 aber eine andere Intensität k_1 hat, und suche die durch diesen Punkt gehende L. gl. H. So kann ich weitergehen und die L. gl. H. suchen von allen Punkten der Parallelen p zur y-Achse. Dieses dazu nötige System von zweifach unendlich vielen Gleichungen würde also eine Schar von unendlich vielen L. gl. H. in der xy-Ebene ergeben. Ein solches System ist jedoch nur eine Grundlage, d. h. kann wohl einen eindeutigen Überblick geben über die gesamten physikalischen Möglichkeiten, in einer Adaptationslage irgendeine bestimmte Helligkeitsempfindung auf den verschiedensten Wegen hervorzubringen, gibt aber noch keine Übersicht über die Anstiegsverhältnisse.

Es fragt sich vielmehr noch zweitens: Was kann ich über das Verhältnis der Empfindungsintensitäten der einzelnen L. gl. H. aussagen? — Ich könnte etwa die Helligkeit jeder einzelnen L. gl. H. in der noch zur Verfügung stehenden dritten Dimension als z-Koordinate auftragen und erhielte dann ein dreidimensionales Gebilde auf der Grundebene aufgebaut, in welchem die L. gl. H. Niveaulinien sind. Dieses Gebilde, die Gesamtheit aller Niveaulinien, bezeichne ich kurz als Niveaufläche. Sie wird dann von der x- und y-Achse an in den Raum zwischen beiden etwa wie ein Hügelland ansteigen. Dabei fragt es sich aber, wie sie ansteigt, ob erst langsam, dann steil, oder umgekehrt, usw. Mit andern Worten, es fragt sich, in welcher Art und Weise habe ich die Empfindungsintensitäten als z-Koordinaten aufzutragen?

Ein ganzes System der L. gl. H. zu geben, ist nun nicht meine Absicht, nur ein Stück habe ich skizziert, aus den später anzuführenden Beobachtungen einige Punkte herausgreifend. Die beobachteten Punkte sind gekennzeichnet, die L. gl. H. nach ihnen so eingezeichnet, wie sie vermutlich verlaufen, doch machen sie außerhalb der beobachteten Punkte keinen Anspruch auf Genauigkeit. Es werden sich in ihnen jedenfalls Schwankungen bemerkbar machen, die von den später zu erörternden Ergebnissen herrühren, und außerdem läßt sich noch sagen, daß die L. gl. H. zur y-Achse asymptotisch verlaufen,

denn jede Helligkeitsempfindung läßt sich auch in kürzester Zeit erreichen, wenn die dazu verwendete Intensität groß genug ist.

Auf das psychophysische Problem soll in dieser Arbeit nicht eingegangen werden; doch läßt sich noch verschiedenes Interessante über den Anstieg sagen. Ich habe nämlich einige Querschnitte durch jene Niveaufläche, die die Verhältnisse der Empfindungsintensitäten darstellen würde, gelegt, und zwar Schnitte parallel der xz-Ebene. Die Schnittkurve einer solchen Ebene mit jener Niveaufläche wird dann den Anstieg und Verlauf der Erregung bei einer bestimmten Intensität aus der Gesamtheit aller Intensitäten herausgreifen. Um diese Schnittkurven graphisch veranschaulichen zu können, muß ich, da ich die wirklichen psychophysischen Verhältnisse noch nicht kenne, für die erreichten Empfindungsintensitäten einen Maßstab annehmen, und zwar nehme ich als das Einfachste an, daß zu einer bestimmten Zeit z die erreichten Empfindungsintensitäten proportional seien den dazu verwendeten physikalischen Intensitäten. Ob dies tatsächlich der Fall ist, kommt hier nicht in Frage; die mit diesem Maßstab gezeichneten Kurven sollen ja auch nicht die wirklichen Verhältnisse darstellen, sondern nur das Merkwürdige im Anstieg veranschaulichen helfen, das auch bei Anwendung eines andern Maßstabes sich noch zeigen würde. (Dieser provisorische Maßstab wird bei erfolgter Lösung des psychophysischen Problems nach den gefundenen Verhältnissen abzuändern sein, worauf dann auch die Kurven die wirklichen Anstiegsverhältnisse darstellen.)

Andere Autoren benutzen zur Konstruktion ihrer Kurven andere Maßstäbe, ohne sich aber darüber Rechenschaft zu geben, daß mit der Annahme eines solchen Maßstabes, wenn es nicht ausdrücklich verneint wird, die Lösung des psychophysischen Problems schon vorausgesetzt ist. Martius z. B. macht dieselbe Annahme einer derartigen Proportionalität, und zwar gültig für jede beliebige Zeit z, die die Maximalzeit überschritten hat. Eine andere Annahme macht Exner und mit ihm Mc Dougall; sie setzen die Empfindungsintensitäten proportional den physikalischen Intensitäten, aber nur dann, wenn die Dauer gleich ist der Maximalzeit der betreffenden Intensität.

Ich verfolge nun die oben definierte Anstiegskurve einer Intensität n (= Normalreiz), indem ich beobachte, daß der Normalreiz von der Intensität

n in 10^{σ} ebenso hell erscheint wie ein Vergleichsreiz von der Intensität v_1 [1])
» » 20^{σ} » » » » » » » » » » v_2
» » 30^{σ} » » » » » » » » » » v_3
usw. usw.,

wenn $v_1\ v_2\ v_3$ . . . alle eine bestimte Zeit z wirken, und indem ich in ein Koordinatensystem die Zeiten als Abszissen und als Ordinaten, die bei der konstanten Zeit z erreichten Empfindungsintensitäten proportional den Intensitäten $v_1\ v_2\ v_3$ . . . auftrage. Zwei zugehörige Punkte des Normal- und Vergleichsreizes liegen in Wirklichkeit auf einer Linie gleicher Helligkeit, einer Niveaulinie, die jedoch auf dem Querschnitt als Parallele zur Abszissenachse erscheint (vgl. Fig. 4).

Willkürlich ist in vorliegender Arbeit noch die konstante Dauer z des Vergleichsreizes; da bei längerer Dauer des Vergleichsreizes die Fixation erschwert wird und eine Einwirkung auf die benachbarten Netzhautstellen nicht ausgeschlossen ist, besonders bei Dunkeladaptation, ging ich bei dieser nicht über 100^{σ} hinaus; bei Helladaptation wählte ich neben den kurzen Zeiten von 20^{σ} und 53^{σ} auch bei einer Untersuchung eine längere Zeit $z = 320^{\sigma}$.

Zunächst seien noch einige Forderungen erwähnt, die für die Konstruktion der Versuchsanordnung maßgebend waren. Es ist wichtig, daß die Beleuchtung innerhalb des ganzen Beobachtungsfeldes möglichst momentan einsetzt und wieder verschwindet. Das läßt sich aber nur dadurch erreichen, daß das gesamte zur Beleuchtung des Feldes dienende Strahlenbündel von einem sehr kleinen Raume ausgeht und durch den Apparat zur Abgrenzung der Expositionszeit unmittelbar vor diesem Raume in kürzester Zeit, also annähernd momentan, freigegeben und wieder abgeschnitten wird. Zu diesem Zwecke wurde öfters der Brennpunktsdurchschnitt gewählt, aber es ist optisch nicht ganz einfach, einen wirklichen Brennpunkt bei großer Lichtstärke herzustellen; vielmehr erhält man stets eine mehr oder minder ausgedehnte Brennfläche, und der zeitliche Abschnitt erfolgt dann auch nicht momentan. Genauer und einfacher ist das Camera obscura-Prinzip mit schmalem Spalt, das ich mit großem Vorteil verwendete. Doch wird durch einen schmalen Spalt die Lichtintensität derart vermindert, daß eine solch genaue Methode nur

[1]) $1^{\sigma} = 0{,}001$ Sekunde.

bei Dunkeladaptation anwendbar ist, während man bei Helladaptation zur Erreichung einer größeren Helligkeit eine etwas längere Zeit für die sukzessive Erleuchtung des Beobachtungsfeldes mit in Kauf nehmen muß.

Ein ähnlicher Zeitfehler wäre nicht zu vermeiden, wenn ich die Variation der Intensität bei den kurzen Vergleichsreizen durch einen Episkotister vornehmen wollte; näherliegend ist hier die Variation der Intensität durch Änderung der Spaltbreite.

Noch bemerken möchte ich, daß ich es als sehr nachteilig bei Vergleichung der Resultate anderer Autoren empfand, daß nirgends eine exakte Helligkeitsangabe zu finden war und es daher kaum möglich ist, die gefundenen Maximalzeiten etwa mit denen anderer Autoren in Beziehung zu setzen.

Versuchsanordnung für Dunkeladaptation.

Neben dem bereits erwähnten präzisen Lichtabschnitt wurde bei der vorliegenden Anordnung das Hauptgewicht darauf gelegt, daß

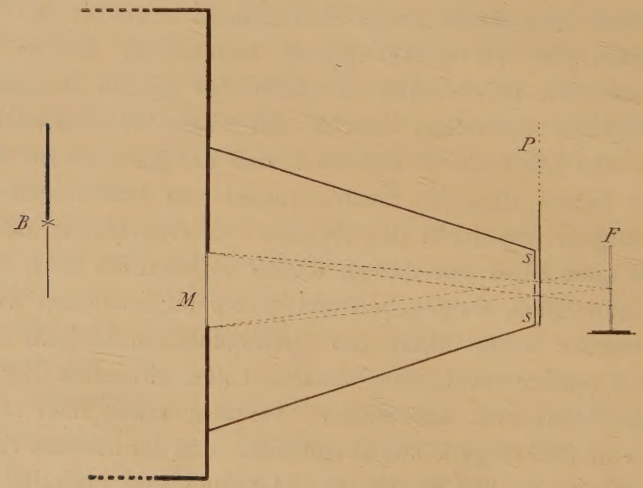

Fig. 2.

der Normalreiz und der Vergleichsreiz von einer und derselben Lichtquelle versorgt wurden. Zur Beleuchtung diente eine Differentialbogenlampe *B*, die, gut reguliert, ein sehr gleichmäßiges Licht lieferte. Sie war in einem durch schwarzes Tuch vollständig verdunkelten

Kasten untergebracht und erleuchtete mit der Sphäre ihrer größten Helligkeit (etwa 30° nach abwärts gerichtet) 18 cm von ihrem Lichtbogen, also ziemlich intensiv, aber doch durch die abwärts gerichtete Strahlung vollständig gleichmäßig, ein Fenster aus Milchglas *M* von 8,5 : 10,5 cm Ausdehnung. Für die größte bei Dunkeladaptation verwendete Helligkeit wurde dieses Fenster gleichzeitig von zwei Bogenlampen, die eng nebeneinander hingen, auch aus dieser Entfernung erleuchtet.

Dieses diffus helleuchtende Milchglasfenster benutzte ich nun als Lichtquelle für beide Reize. Von ihm entwarf ich nach Art der optischen Lochcamera zwei Bilder durch zwei Öffnungen, die im Abstand von 12 mm senkrecht untereinander angebracht waren. Von diesen Öffnungen war die obere quadratisch und unveränderlich 1 qmm groß, während die andere durch eine feine Mikrometerschraube von 0 bis 2 mm Breite sich variieren ließ. Die senkrechte Längenausdehnung dieses variabeln Spaltes war dieselbe wie beim oberen konstanten Spalt, also 1 mm. Die Ganghöhe der Mikrometerschraube war $^1/_3$ mm, der runde Griff der Schraube in 10 Teile geteilt, wobei sich aber noch $^1/_4$ eines Teilstriches genau ablesen ließ.

Dieser zur Variation der Intensität dienende Spaltapparat *SS* war 26 cm vom leuchtenden Fenster *M* angebracht und der Zwischenraum mit schwarzem Karton umdunkelt. Durch die beiden Öffnungen wurden nun von dem hellen Fenster zwei Bilder auf einer Milchglasplatte *F* entworfen, deren Stellung derart reguliert war, daß der untere Rand des oberen Bildes mit dem oberen Rande des unteren Bildes zusammenfiel, die beiden Bilder also unmittelbar aneinander grenzten. Durch die geringe Ausdehnung der Öffnungen waren die Bilder genügend scharf und konnte das untere Bild, das den Vergleichsreiz bildete, in seiner Intensität durch Änderung des Spaltes von Null bis zur doppelten Helligkeit des oberen Feldes proportional den Spaltbreiten abgestuft werden. (Eine zur Sicherheit vorgenommene Eichung bestätigte, daß sich die Intensität proportional den Spaltbreiten änderte.)

Zur Variation der Zeit benutzte ich ein großes Pendeltachistoskop. Das Pendel *P* hatte einen Radius von 56 cm und wurde elektromagnetisch festgehalten. Nach Umschalten des Stromes schwang es, um von den dadurch erregten Magneten auf der andern Seite wieder

aufgefangen zu werden. Eine probeweise Eichung lieferte vorzügliche Resultate betreffs der Konstanz der Schwingungen, und auf Grund einer zweiten Eichung ließ ich mir einen Aluminiumsektor von nebenstehender Form (Fig. 3) konstruieren, der an das Pendel angeschraubt wurde. Er schwang nun unmittelbar vor den Öffnungen des oben beschriebenen Spaltapparates vorbei, und zwar während des Versuches immer in derselben Richtung (beim Rückschwingen wurde nicht beobachtet). Das untere Feld (der Vergleichsreiz v) war während des Vorbeiganges des unteren freien Raumes z erleuchtet (z konstant 100^{σ}), während die Dauer der Darbietung des oberen Feldes (des Normalreizes n) von der Einstellung eines kleineren verschiebbaren Sektors abhing und sich von 0 bis 320^{σ} in Schritten von 10 zu 10^{σ}

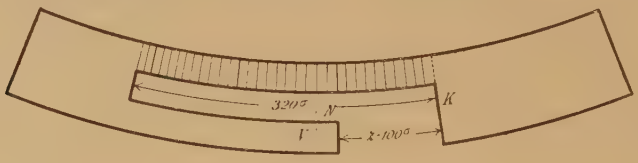

Fig. 3.

variieren ließ. Beim Versuche erfolgte die Schwingung immer in der Richtung, daß beide Reize durch die Kante K gleichzeitig abgeschnitten wurden.

Indem so die zur Erleuchtung der Beobachtungsfelder dienenden Lichtkegel, die von den beiden Spalten N und V ausgingen, in kürzester Zeit freigegeben und wieder abgeschnitten wurden, war beim Versuch vom Vorbeigehen des Randes nichts zu merken; die Bilder erschienen und verschwanden momentan.

Da diese Versuche bei vollständiger Dunkeladaptation angestellt werden sollten, so wurde jeder noch etwa aus dem Bogenlampenkasten sich verbreitende Lichtschein durch einen vor dem Beobachter befindlichen Schirm aus schwarzem Tuch abgehalten, durch den allein ein etwa 60 cm langes Beobachtungsrohr ging. Dadurch wurde jedes etwa seitlich ins Auge fallende Nebenlicht abgeblendet.

Eine größere Schwierigkeit bereitete mir anfangs die Fixation, die ich auf verschiedene Art versuchte; zuerst durch einen elektrischen Induktionsfunken, der zwischen zwei feinen, nur durch einen Messerschnitt getrennten Stanniolspitzen übersprang, die auf der als Beob-

achtungsfeld dienenden Milchglasscheibe F aufgeklebt waren. Aber die Helligkeit dieses Funkens war schon zu groß und störte die Dunkeladaptation. Dann beobachtete ich durch einen unter 45° zum Beobachtungsfelde geneigten Spiegel, dessen Belag an einem Punkt entfernt war. Dieser mit Papier hinterklebte Punkt wurde nun von rückwärts erleuchtet, und ich konnte seine Intensität so weit abschwächen, daß er bei vollständiger Dunkeladaptation gerade noch wahrgenommen wurde. Der Lichtpunkt lag auf der Grenze von beiden Feldern und wurde momentan dargeboten; der Beobachter suchte sich schnell die Richtung und machte kurze Zeit nach Verschwinden des Fixationspunktes den Versuch. Auf diese Weise ist die Untersuchung der ersten Kurve bis zu 100^{σ} durchgeführt.

Indem bei diesen Versuchen der Beobachter seinen Kopf auf eine Kinnstütze legte und sein Auge an das Beobachtungsrohr brachte, bekam er nun bereits eine ziemlich genaue Richtung nach dem Beobachtungsfelde, und ich konnte nach einiger Übung dazu übergehen, die Versuche ganz ohne Fixation anzustellen. Dabei stellte es sich heraus, daß durch eine nicht vollständige Abdunkelung des Spaltapparates auf dem Beobachtungsfelde ein minimaler Lichtnebel erschien, allerdings erst nach der jeder Versuchsreihe vorangehenden Adaptation von etwa 20 Minuten. Dieser Lichtnebel, der von andern weniger geübten Beobachtern nicht oder nur manchmal wahrgenommen wurde, erleichterte mir ungemein die Fixation, ohne jedoch die Dunkeladaptation irgendwie zu stören.

Im Gegenteil diente mir das Erkennen dieses Lichtnebels als Kriterium dafür, daß das Sehfeld des beobachtenden Auges wirklich gut war, indem nämlich nur bei ganz reinem Sehfelde dieser Lichtnebel erschien. In der Zwischenzeit nach jedem Versuche, ungefähr 2—3 Minuten, machten sich bald mehr, bald weniger die bekannten subjektiven Lichtnebel bemerkbar, hauptsächlich im Anfang derjenigen Versuchszeiten, die der Mittagsmahlzeit folgten. Nach Verschwinden dieser subjektiven Lichtnebel wurde das Blickfeld des Auges tiefschwarz, der objektive Lichtnebel war sichtbar, und dann erfolgte der Versuch, indem der Beobachter selbst den Schalter umlegte. Dadurch wurde der Strom des einen Magneten unterbrochen, das Pendel begann zu schwingen; zugleich wurde der gegenüberliegende Magnet erregt, der das Pendel wieder auffing; dazwischen lag die Zeit der

Erhellung der Felder. Dann wurde, ohne zu beobachten, der Schalter zurückgelegt; das Pendel schwang zurück und der Apparat war für den nächsten Versuch fertig. Durch die eigenhändige Auslösung konnte der Beobachter sich den günstigsten Moment für den Versuch auswählen.

Die Urteile wurden im Dunkeln notiert, nur die neue Einstellung der Spaltbreite besorgte der Experimentator beim Scheine einer kleinen elektrischen Taschenlampe, währenddessen der Beobachter die Augen mit einem schwarzen Tuche bedeckte. Später mußte ich aus Mangel an Experimentatoren dazu übergehen, selbst die Veränderung der Spaltbreite zu besorgen. Dabei verdeckte ich das rechte Auge mit einer Kappe, und die Einstellung geschah mit dem linken Auge; die Adaptation des rechten Auges wurde dadurch kaum gestört, doch wurde zur Sicherheit eine etwas längere Adaptationspause gemacht.

Bei Dunkeladaptation wurde der Verlauf für drei verschiedene Helligkeiten untersucht, und zwar waren es die Helligkeiten eines 1) von 0,072, 2) von 0,145 und 3) von 0,26 Meterkerzen senkrecht beschienenen weißen Papieres. Daß solch geringe Helligkeiten zur Verwendung kamen, darf nicht verwundern, denn man muß die enorme Steigerung der Empfindlichkeit für Helligkeiten bei Dunkeladaptation in Betracht ziehen. Die Bestimmung der Helligkeiten geschah durch Bunsenphotometer unter Benutzung einer Normal-Hefnerkerze.

Resultate aus den Beobachtungen für Dunkeladaptation.

Zunächst untersuchte ich den Verlauf des Anstieges bis zu 100^{σ}, der konstanten Dauer des Vergleichsreizes, bei der mittleren Helligkeit von 0,145 Meterkerzen. Das Resultat zeigt die Kurve Fig. 4, die unter Annahme des im Eingang erwähnten Maßstabes gezeichnet ist. Beobachtet sind die eingezeichneten Punkte; ihre Zusammenstellung findet sich in Tabelle I. Die Kurve selbst ist nach dem mutmaßlichen Verlaufe eingezeichnet.

Für diese und die folgenden Kurven war der Beobachter der Verfasser selbst, für Fig. 4 außerdem Herr Dr. Wirth; eine größere Anzahl von Punkten wurde auch, wie in den betreffenden Tabellen

angegeben ist, von andern Beobachtern geprüft und ziemlich übereinstimmend beurteilt, so daß der Verlauf in seinen Grundzügen wohl als Norm anzusehen ist. Als Beobachter bzw. Experimentatoren fungierten noch die Herren Deuchler, Heyde, Kästner, Keller, Salow, Van Cauwelaert und Wabeke. Jeder beobachtete Punkt war durch eine Versuchsreihe gefunden, zu der durchschnittlich 25 Versuche gehörten. Man ging vom deutlichen Unterschiede der beiden Felder (heller oder dunkler in beliebiger Abwechselung) aus, nach der Methode der Minimaländerungen durch die Gleichheit hindurch bis zum deutlichen Unterschied im entgegengesetzten Sinne und, wenn es die Zeit erlaubte, auch wieder rückwärts, ohne daß sich eine wesentliche Verschiedenheit in der Lage der Gleichheit gezeigt hätte; doch wurde jede Versuchsreihe nicht gern über eine Stunde ausgedehnt, um eine eventuelle Ermüdung auszuschließen, denn die Versuche waren für die Augen ziemlich anstrengend. Nicht unerwähnt möchte ich lassen, daß das Rauchen noch für den folgenden Tag bei mir die Unterschiedsempfindlichkeit wesentlich beeinträchtigte und ich es daher fast vollständig aufgeben mußte.

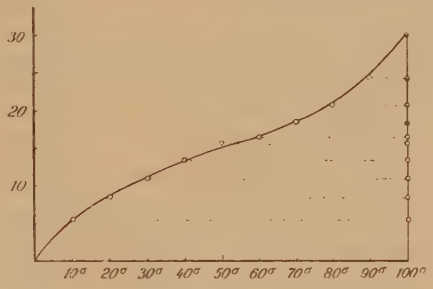

Fig. 4.

Einige Versuchsprotokolle mögen die Art und Weise des Vorgehens veranschaulichen, wobei auch jede geäußerte Abstufung in der Größe des Helligkeitsunterschiedes zu Protokoll genommen wurde. Die Zahlen geben die direkt abgelesenen Spaltbreiten an, die jedoch wegen der Lage des Nullpunktes noch einer Korrektur von $3\,^3/_4$ Teilstrich bedurften. Es kam natürlich auch vor, daß zur Bestimmung eines Punktes mehrere Stunden nötig waren, einmal in größeren Schritten eine ungefähre Feststellung der Lage der Gleichheit, dann eine genauere Einstellung.

Mittw., d. 17. Aug. 04. $v = 100^{\sigma}$ $n = 50^{\sigma}$
Beob.: Büchner. Experimentator: Keller.

9	*he*	*du*	*du*		
$9^{1}/_{2}$	*△du*	*△du*	*△du*		
10	*du*	*du*	*△du*		
$10^{1}/_{2}$	*gl*	*du*	*du*	*du*	
11	*du*	*du*	*du*		
12	*gl*	*gl-du*	*gl-du*	*gl*	
	gl	*gl*	*gl-du*		
$12^{1}/_{2}$	*he*	*gl-du*	*gl-du*	*he*	
	he	*he*			
12	*gl-du*	*gl*	*gl-he*	*gl*	
$11^{3}/_{4}$	*gl*	*gl-du*	*gl-he*	*gl-△du*	*gl-△du*

Gleichheit 12

Mont., 22. Aug. 04. $v = 100^{\sigma}$ $n = 60^{\sigma}$
Beob.: Büchner. Exp.: Keller.

11	*du*	*du*		
$11^{1}/_{2}$	*du*	*du*		
12	*du*	*du*		
$12^{1}/_{2}$	*du*	*gl-△³du*	*gl*	
13	*gl-△he*	*gl*	*gl-(he)*	
$13^{1}/_{2}$	*he*	*he*		
13	*gl-△he*	*gl-△he*		
$12^{3}/_{4}$	*(gl-△du)*	*(gl-he)*	*gl*	*gl*

Gleichheit $12^{3}/_{4}$
△du = wenig dunkler, eine Idee dunkler u. dgl.

Die auf diese Weise gewonnene Kurve (Fig. 4) zeigte nun als erstes Hauptresultat ungemein deutlich eine Schwingung, die ich zuerst auf eine Ungenauigkeit des Spaltes zurückzuführen geneigt war, obgleich ich früher bei der Eichung nichts davon bemerkt hatte. Diese ersten Versuche hatte ich mit Herrn Dr. Wirth angestellt, der in optischen Beobachtungen eine besondere Übung besaß, so daß ich diese Schwingung nicht als Versuchsfehler ansehen konnte, um so weniger, als sie so regelmäßig verlief. Ich stellte nun selbst diese Beobachtungen nochmals an und fand das gleiche Resultat. Um zu sehen, ob diese Schwingung durch den Spaltapparat verschuldet war, mußte ich denselben Verlauf durch andere Spaltbreiten messen und erreichte dies dadurch, daß ich ausnahmsweise eine andere Dauer für den Vergleichsreiz nahm: statt 100^{σ} etwa 53^{σ}. War die Schwingung im Verlaufe des Anstieges, so mußte sie in derselben Art und Weise wiederkehren; war sie im Spaltapparat, so mußte sie sich zwischen den Spaltbreiten 0 bis 30, wo sie vorher erschienen war, auch jetzt wieder zeigen, in diesem Falle also im Intervall bis 53^{σ}. Das Resultat dieser Untersuchung zeigt Fig. 5. Berücksichtigt man außerdem, daß nach Fig. 4 bei 53^{σ} nur etwa $^{16}/_{30}$ der bei 100^{σ} erreichten Helligkeit zur Geltung kommen, verkürzt also die Ordinaten der beobachteten Kurve I in Fig. 5 im Verhältnis 16 : 30, so erhält man eine

Kurve II, die fast vollständig mit der in Fig. 4 gezeichneten übereinstimmt. Dadurch war sicher erwiesen, daß die beobachtete Schwingung tatsächlich im Verlaufe der Erregung liegt.

Nachdem ich so bereits im Anfang des W. S. 1904/05 diese Schwingung festgestellt hatte, ging ich nun daran, den Verlauf der Kurve bei jener Vergleichsreizdauer von 100^{σ} und der Helligkeit von 0,145 Meterkerzen weiter zu verfolgen. Es zeigt diesen Verlauf die Kurve II in Fig. 6. Die angefangene Schwingung setzt sich in einer Periode von ungefähr 80^{σ} fort, die sich allerdings nach und nach etwas zu verkürzen scheint und deren Amplitude sich zugleich bei diesem Verlaufe vermindert. Mit der dritten Welle erreicht der Anstieg etwa bei 200^{σ} sein Maximum. Danach fällt die Kurve ziemlich steil ab, um sich dann wieder etwas zu heben und dem jedenfalls gleichförmig sich langsam senkenden Verlaufe bei längerer Dauer zuzustreben, doch konnte ich diesen Verlauf nicht weiter verfolgen, und lag es auch nicht in meiner Absicht.

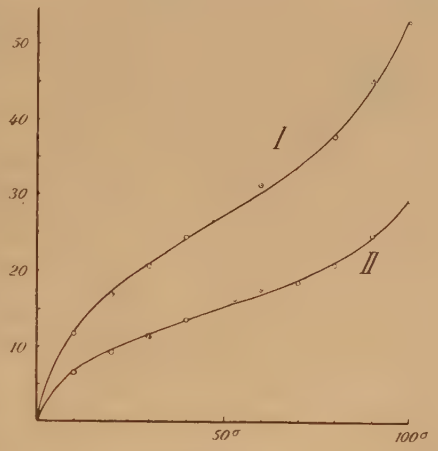

Fig. 5.

Da sich der Verlauf so exakt verfolgen ließ, so untersuchte ich nun eine geringere Helligkeit (0,072 Meterkerzen), um speziell auch über die eventuelle Veränderung der Maximalzeit etwas zu erfahren. Diese Abschwächung bewirkte ich durch ein dunkles Glas, das nur die Hälfte der Helligkeit durchließ und vor dem Spalte des Normalreizes befestigt wurde. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt Kurve I in Fig. 6. Das Maximum liegt bei etwa 230^{σ} und ist unzweifelhaft vom vorigen verschieden. Bei dieser geringen Helligkeit kamen aber die Schwingungen kaum deutlich zur Geltung, wie ja zu vermuten war. Zugleich stimmt die Maximalzeit mit der von Dürr bei Dunkeladaptation gefundenen ziemlich gut überein; auch war in der Tat nach meiner Erkundigung die von Dürr gewählte Helligkeit sehr gering. Dagegen konnte ich die von Dürr ausgesprochene

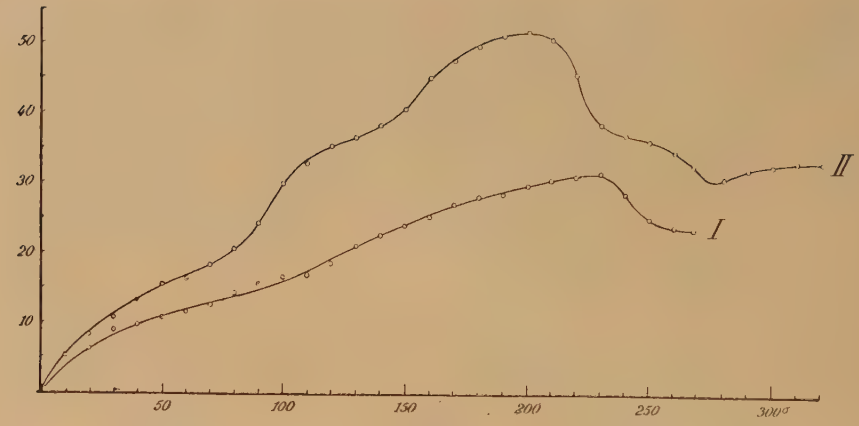
30
40
30
20
10
50
100
150
200
250
300
II
I

Fig. 6.

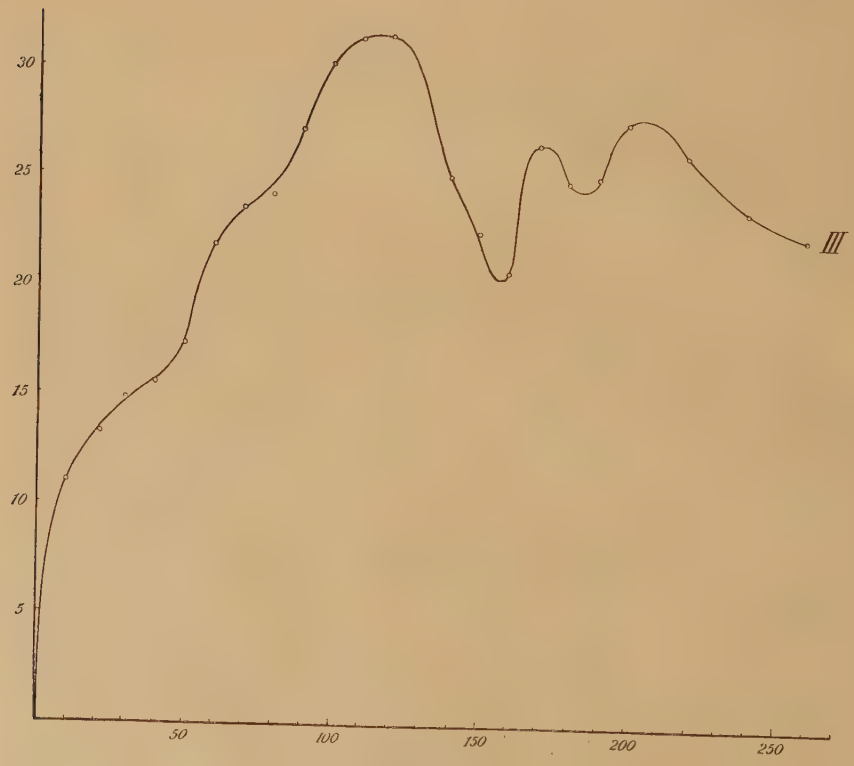
30
25
20
15
10
5
50
100
150
200
250
III

Fig. 7.

Vermutung einer konstanten Maximalzeit für verschiedene Intensitäten nicht bestätigen; denn eine von der Intensität abhängige Variation der Maximalzeit war schon jetzt unverkennbar und wurde durch eine dritte Untersuchung noch deutlicher.

Um mich über die Verhältnisse der Schwingung noch genauer zu orientieren, untersuchte ich den Verlauf bei einer Helligkeit von 0,26 Meterkerzen, indem ich das als Lichtquelle dienende Milchglasfenster, wie schon erwähnt, mit zwei Bogenlampen erleuchtete. Das Resultat wird durch Kurve III in Fig. 7 veranschaulicht. Die Schwingungen sind hier wieder vollständig ausgeprägt; wieder wird mit der dritten Schwingung das Maximum erreicht, und zwar bei einer bedeutend kürzeren Zeit, bei 120^{σ}. Entsprechend dem steileren Anstiege ist auch der Abfall nach dem Maximum jäher und tiefer, und die Kurve erhebt sich nach diesem Abfall wieder ganz deutlich; weitere Schwingungen prägen sich noch aus, und allmählich scheint sich ein ruhigerer Verlauf bei länger dauernder Reizung einzustellen. (Eine weitere Diskussion der Resultate findet sich am Schluß bei gleichzeitiger Verwertung der Resultate bei Helladaptation.)

Erläuterungen zu Tabelle I.

Die ersten beiden Kolonnen geben die von mir beobachteten Spaltbreiten und die Anzahl der zur Feststellung des Punktes benötigten Versuche; die übrigen Punkte sind dann nochmals von den angegebenen Versuchspersonen beobachtet.

$n = 0{,}145$ *M. K.* $z = 53^{\sigma}$ $n = 0{,}145$ *M. K.* $z = 100^{\sigma}$

Normalreiz in σ	Büchner: Spaltbreiten	Büchner: Anzahl der Versuche	Beobachter	Spaltbreiten	Anzahl der Versuche		Büchner: Spaltbreiten	Büchner: Anzahl der Versuche	Beobachter	Spaltbreiten	Anzahl der Versuche	Beobachter	Spaltbreiten	Anzahl der Versuche
10	11,75	33					5,50	52	Dr. Wirth	5,50	23			
20	17,—	30					8,50	48	»	8,65	25			
30	20,75	27	Salow	20,75	16		11,—	33	»	11,—	50			
40	24,75	53					13,50	31	»	13,75	23			
53	30,25	36				50	15,75	24,38	»	15,75	20	Wabeke	15,60	25
60			Salow	31,75	18		16,50	20	»	16,75	32			
70	33,75	32					18,50	29	»	18,25	23			
80	38,25	35					20,75	24	»	21,25	19	»	20,75	16
90	45,75	32	Salow	46,75	18		24,50	29	»	24,25	50	»	23,75	39
100	53,75	30	Salow	53,75	13	100	30,25	33	»	30,—	14			
110							33,—	23	Kästner	33,75	18			
120							35,50	22						
130							36,75	25	Salow	36,75	16			
140							38,50	23	Kästner	38,75	19			
150						150	40,80	21	Salow	41,25	15			
160							45,25	20	»	44,75	16			
170							47,75	33						
180							49,75	33						
190							51,25	35						
200						200	51,75	41						
210							50,75	35	»	50,75	17			
220							45,75	31	»	44,75	16			
230							38,75	27						
240							37,25	16						
250						250	36,25	49						
260							34,75	25						
268							32,75	15	Kästner	32,75	23			
280							31,—	31	Salow	30,75	20			
290							32,25	34						
300						300	32,75	23	»	32,75	18			
310							33,25	28						
320							33,25	18						

Sa.: 3439 Versuche, 140 beobachtete Punkte;

I.

$n = 0{,}072$ *M. K.* $z = 100^{\sigma}$ $n = 0{,}26$ *M. K.* $z = 100^{\sigma}$

	Büchner		Beobachter	Spaltbreiten	Anzahl der Versuche		Büchner		Beobachter	Spaltbreiten	Anzahl der Versuche
	Spaltbreiten	Anzahl der Versuche					Spaltbreiten	Anzahl der Versuche			
							11,—	18	Büchner	11,—	26
Kästner	6,50	12	Salow	6,75	14		13,25	27			
	9,25	22	»	9,25	13		14,75	28			
	10,—	25	»	10,—	18		15,50	31			
50	11,10	29				50	17,25	32	Keller	17,50	22
	11,80	27	Kästner	11,80	21		21,85	32			
	12,75	27					23,50	23			
	14,50	38					24,—	26			
	15,75	30					27,—	22	»	27,25	19
100	16,75	32	Salow	16,—	24	100	30,—	14			
	17,—	32					31,12	38			
	18,75	36					31,25	18	»	31,25	17
	21,25	32					30,—	13	»	30,12	14
	22,75	30,29					24,80	22	»	25,—	19
150	24,25	35	»	24,25	17	150	22,25	18			
	25,50	22	»	25,50	19		20,50	23	»	20,75	12
	27,25	25	Kästner	27,25	27		26,25	16	Büchner	26,25	23
	28,30	29					24,50	17	»	24,66	20
	28,70	27					24,75	21			
200	30,—	25	Salow	30,—	21	200	27,25	21			
	30,70	27									
	31,25	32					25,75	24			
	31,75	24	Kästner	31,75	14						
	28,75	23	Salow	28,75	19		23,25	16			
250	25,25	20	»	25,50	17	250					
	24,—	29					22,—	21			
	23,75	24									

pro Punkt durchschnittlich 25 Versuche.

Versuchsanordnung für Helladaptation.

Wegen der geringen Helligkeit des Beobachtungsfeldes, die sich in der vorigen Anordnung nicht wesentlich vergrößern ließ, war diese Anordnung für Helladaptation nicht beizubehalten. Vielmehr mußte ich zur Erreichung einer größeren Helligkeit einen Vorteil aufgeben, nämlich den momentanen Abschnitt der Erleuchtung und Verdunkelung der Felder. Hier erfolgte der Abschnitt durch den Vorbeigang der betreffenden Kante des in der vorigen Anordnung verwendeten Sektors über die Breite des Beobachtungsfeldes, doch kam eine vollständig gleichmäßige Empfindung auf dem ganzen Felde zustande.

Eine bei allen Versuchen gleichmäßige Adaptation wurde dadurch erreicht, daß der Beobachter auf einen Schirm F von weißem Papier

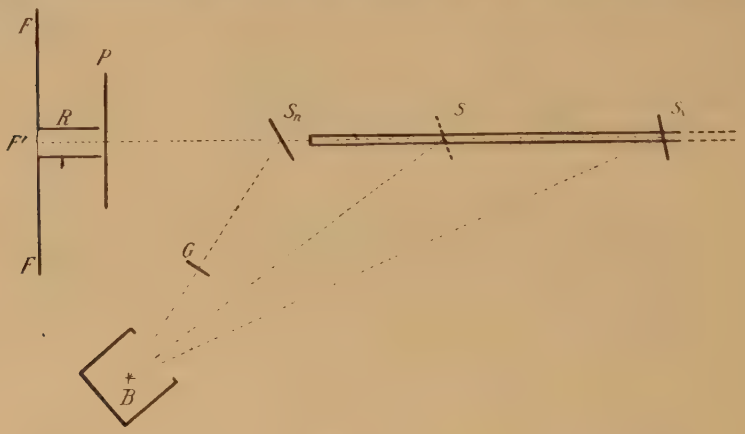

Fig. 8.

blickte, der von zwei, rückwärts rechts und links über dem Kopfe des Beobachters befindlichen elektrischen Glühlampen erleuchtet war. Die genaue Bestimmung der Helligkeit dieses Schirmes ergab 18,5 Meterkerzen. Auch der Tisch vor dem Schirme war mit diesem Papier bekleidet, so daß der Beobachter zur Einhaltung der Adaptation nicht fortwährend geradeaus zu blicken brauchte, sondern auch bequem die Augen senken konnte, ohne die Adaptation zu stören. Dieses weiße Papier, ein gutes gleichmäßiges Schreibpapier, war glatt auf ein Brett aufgezogen, das in der Mitte eine größere Öffnung F' besaß, so daß diese Stelle des weißen Schirmes gleichzeitig von rückwärts erleuchtet werden konnte. Durch diese Öffnung wurden nun

von rückwärts die Helligkeiten vom Normal- und Vergleichsreiz auf den weißen Schirm geworfen; das durchgelassene Licht kam dann zur Beobachtung. Die Beobachtungsfelder lagen demnach in der Adaptationsfläche; ein Punkt zwischen beiden Feldern ermöglichte eine exakte Fixation; die Entfernung des Auges von den Feldern betrug wie bei Dunkeladaptation 65 cm.

Als Lichtquelle diente hier, und auch wieder für beide Reize, eine Projektionsbogenlampe *B*, die ihre größte Helligkeit frei nach vorn, also ohne Zwischenschaltung der Projektionslinsen, ausstrahlte. Durch den feststehenden Spiegel *Sn* wurde aus dem Lichtkegel der Bogenlampe die zu untersuchende Normalhelligkeit *n* von rückwärts auf den weißen Schirm geworfen, und die variable Vergleichshelligkeit *v* durch einen zweiten Spiegel *Sv*, der auf einer optischen Bank verschoben und durch den die Länge des Weges der Lichtstrahlen und damit die Helligkeit des Feldes verändert werden konnte. Beide Spiegel waren von extradünnem Glase und aus einem Stücke geschnitten, so daß ich sie als gleich ansehen konnte.

Spiegel *Sn* stand außerdem derart, daß er das von ihm beleuchtete Feld vor den von *Sv* ausgehenden Strahlen schützte. Dadurch ließ sich erreichen, daß beide Felder eng nebeneinander lagen, nur durch einen 1 mm breiten Streifen eines Diaphragmas getrennt, das ich, um eine scharfe Begrenzung der Felder zu ermöglichen, auf der Rückseite des Beobachtungsschirmes angebracht hatte. Damit ich nun auch die Helligkeit des Feldes von *Sv* bequem größer machen konnte als die von *Sn* und *Sn* sein Feld vor den Strahlen von *Sv* schützte, setzte ich vor *Sn* ein dunkles Glas *G*. Dies hatte die Wirkung, als wenn ich *Sn* ein Stück nach rückwärts verschoben hätte, etwa in die Stellung *S*. Die Normalhelligkeit entsprach also dem Wege *BSF*, und die Vergleichshelligkeit ließ sich durch einfaches Verschieben von *Sv* über die Stellung *S* ohne jedes Hindernis größer machen als die Normalhelligkeit.

Durch diese enge Aneinanderlage der Bilder ließ sich auch das vorhin beschriebene Pendeltachistoskop als konstanteste Zeitmessung verwenden, nur für die genaue Abstufung der ganz kurzen Zeiten bei Untersuchung der größten Helligkeit mußte ich es durch ein Falltachistoskop (vgl. Wundt, Studien, Band 16, S. 380ff.) ersetzen. Im letzteren Falle lagen die Beobachtungsfelder horizontal nebeneinander,

doch blieb dabei die Anordnung in ihren Grundzügen unverändert. Das Pendel- bzw. Falltachistoskop *P* stand kurz hinter dem weißen Schirm, und im Raume zwischen *F* und *P* war zur möglichsten Abhaltung von Nebenlicht ein Rohr *R* für den Gang der Lichtstrahlen angebracht. Die ganze Anordnung befand sich im Dunkelzimmer, dessen schwarze Wände, Tische usw. das von der Bogenlampe ausgestrahlte Licht nur wenig reflektierten. Dieses Nebenlicht war äußerst gering gegenüber den zur Verwendung kommenden Helligkeiten, wurde aber doch gemessen und mit in Rechnung gezogen.

Die Helligkeit der Bogenlampe war ungefähr 380 Meterkerzen, doch das Papier des weißen Schirmes ließ nur 23,7 % des auffallenden Lichtes hindurch, so daß etwa 90 Meterkerzen zur Verwendung kamen. Aus den Entfernungen *BSnF'* bzw. *BSvF'* ließ sich dann leicht die Helligkeit der Beobachtungsfelder berechnen, und es sind diesbezügliche Angaben bei der Besprechung der Resultate zu finden. Die Verluste des Spiegels kommen nicht in Betracht, da auch bei der photometrischen Bestimmung der Helligkeit der Bogenlampe der Spiegel *Sv* zwischengeschaltet war.

Resultate aus den Beobachtungen bei Helladaptation.

Mit dieser neuen Anordnung machte ich zunächst einige Versuche zur Feststellung der Maximalzeit nach der bekannten Exnerschen Methode, wodurch auch für Helladaptation eine Abhängigkeit der Maximalzeit von der Intensität nachgewiesen wurde.

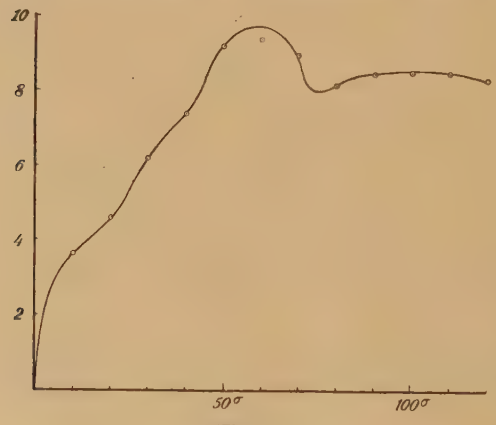

Fig. 9.

Nun untersuchte ich den Anstieg einer Helligkeit von 9 Meterkerzen; die Dauer des Vergleichsreizes war 53^{σ} (den Sektor von 53^{σ} konnte ich von der Dunkeladaptation her verwenden). Das Resultat zeigt die Kurve Fig. 9. Der Anstieg erfolgt in derselben Art und Weise wie bei Dunkeladaptation. Die Erregung erreicht mit der dritten Schwingung

bei etwa 60^{σ} ihren Höhepunkt, fällt rasch ein wenig und steigt darauf wieder um ein geringes, sich dann der dauernden Helligkeitsempfindung zuwendend, die sich durch ein langsames Senken auszeichnet.

Gegenüber den Beobachtungen bei Dunkeladaptation fällt es auf und kehrt bei allen Untersuchungen für Helladaptation wieder, daß der oszillatorische Hauptvorgang, der sich in dem kurzen Abfall nach dem Maximum äußert, schnell zur Ruhe kommt, und daß die Dauererregung nur wenig vom Maximum überschritten wird. (Die Zusammenstellung der Beobachtungen für Helladaptation findet sich in Tabelle II.)

Zur Untersuchung einer größeren Helligkeit, deren Anstieg in ganz kurzer Zeit erfolgen mußte, wäre die Abstufung von 10^{σ} zu 10^{σ} nicht ausreichend gewesen. Um noch geringere Zeitintervalle genauer messen zu können, als dies beim Pendeltachistoskop möglich war, benutzte ich ein Falltachistoskop (vgl. S. 19). Als Dauer des Vergleichsreizes nahm ich 20^{σ}; die Abstufung erfolgte von 3^{σ} zu 3^{σ}, und konnte ich in diesen Intervallen bis 45^{σ} fortschreiten.

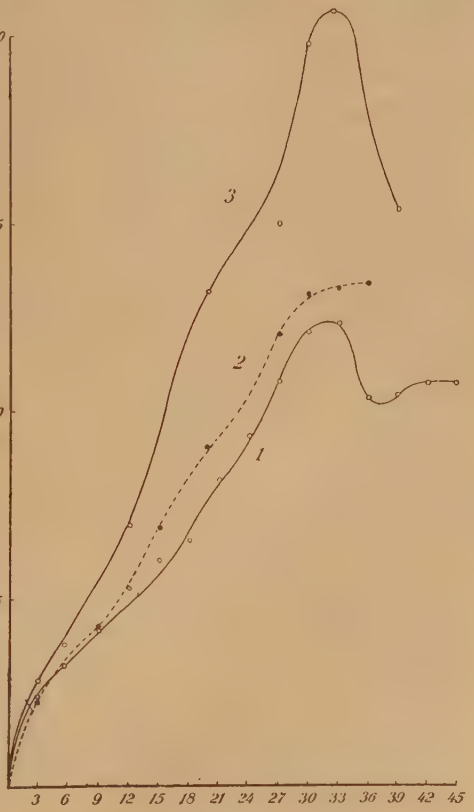

Fig. 10.

Wie schon erwähnt, machte es sich hier notwendig, die Felder für Normal- und Vergleichsreiz nebeneinander zu legen. Die Untersuchung zeigt Kurve 1 in Fig. 10. Die übergelagerten Schwingungen treten hier nicht so deutlich auf; das Maximum wird bei dieser Helligkeit von 57 Meterkerzen bereits bei 33^{σ} erreicht; auch ist

der Abfall nach dem Maximum entsprechend der größeren Helligkeit tiefer.

Ein Ergebnis jedoch war sehr interessant: es stellte sich nämlich heraus, daß die Erregbarkeit für verschiedene Stellen der Netzhaut verschieden war.

Indem bei Helladaptation die Fixation genau innegehalten werden kann und sich während der kurzen Zeit bis 45^{σ} kaum ändert, zeigte es sich, daß die Felder, wenn sie nebeneinander lagen und, wie ich anfangs versuchte, eine Breite von etwa $2\,^{1}/_{2}$ Grad einnahmen, besonders in den Außenteilen nicht gleichmäßig erschienen. Mir schien das rechte Feld, einem andern Beobachter das linke Feld bei kurzen Reizen an der Außenseite von einem etwas dunkleren Streifen begrenzt. Ich verringerte daher die Größe des Beobachtungsfeldes auf die Hälfte, so daß das Feld gleichförmig erschien, und führte damit die Untersuchung der Kurve 1 durch. Dabei hätten die bei normaler Betrachtung gleich erscheinenden Helligkeiten von Normal- und Vergleichsreiz auch bei 20^{σ}, der Dauer des Vergleichsreizes, gleich erscheinen sollen; das war aber nicht der Fall; vielmehr erschien mir das rechte Beobachtungsfeld heller. Es ergab sich also eine Verschiedenheit der Erregbarkeit, und zwar eine Benachteiligung der linken (nasalen) Seite der Netzhautmitte, bzw. eine Steigerung der Erregbarkeit für die temporale Seite der Netzhautmitte.

War dies Ergebnis richtig, so mußte sich die so deutliche Benachteiligung des linken Feldes gegenüber dem rechten in einen Vorteil verwandeln, wenn ich die Raumlage der Felder umkehrte. (Die Anstiegskurve mußte bei demselben Maßstab größere Ordinaten aufweisen.) Ich bewirkte eine solche Vertauschung, indem ich durch einen 45° gegen die Ebene der Felder geneigten Spiegel beobachtete. Die Untersuchung bestätigte denn auch das frühere Ergebnis, wie Kurve 3 zeigt (Fig. 10).

Bei Übereinanderlage der Felder (auch durch Einführung eines Spiegels bewirkt) ergaben sich für einen andern Beobachter Zwischenwerte: Kurve 2 in Fig. 10.

Eine solche Differenz für verschiedene Sehfelder feststellen zu können, war sehr wesentlich, und konnte nur durch die genaue Fixation bei Helladaptation erkannt werden, indem bei den hier verwendeten

Tabelle II. Beobachter: Büchner und teilweise (bei $n = 57$ *M.K.*) Deuchler.

$n = 9$ *M.K.* $z = 53^{\sigma}$

Normalreiz in σ	Vergleichsreiz in *M.K.*	Anzahl der Versuche
10	3,62	21
20	4,58	34
30	6,18	23
40	7,33	37
50	9,13	14
60	9,32	28
70	8,90	38
80	8,09	32
90	8,42	30
100	8,44	36
110	8,42	45
120	8,25	29

$n = 57$ *M.K.* $z = 20^{\sigma}$

Normalreiz in σ	Vergleichsreiz in *M.K.*	Anzahl der Versuche	Vergleichsreiz in *M.K.*	Anzahl der Versuche		Vergleichsreiz in *M.K.*	Anzahl der Versuche
3	11,96	30	13,9	31	Deuchler	11,1	49
6	16,1	37	18,8	42			
9	20,8	47			»	21,3	26
12	26,5	34	34,9	20			
15	30,2	38			»	34,6	25
18	32,9	36					
20			66,1	16	»	45,2	23
21	40,9	36					
24	46,9	35					
27	54,2	18	75,2	28	»	60,6	27
30	60,7	19	99,4	43	»	65,7	21
33	61,9	19	102,9	24	»	66,6	23
36	51,9	40			»	67,3	32
39	52,4	24	77,2	31			
42	53,9	12					
45	53,9	16					

Sa.: 1646 Versuche; 55 beobachtete Punkte;
pro Punkt durchschnittlich 30 Versuche.

$n = 15{,}5$ *M.K.* $z = 320^{\sigma}$

Normalreiz in σ	Vergleichsreiz in *M.K.*	Anzahl der Versuche
10	5,87	33
20	7,77	18
30	9,30	26
40	11,20	24
50	12,60	27
60	15,20	25
70	15,90	20
80	14,60	44
90	14,80	46
100	14,80	27
110		
120		
130		
140		
150	13,10	49
160		
170		
180		
190		
200	12,60	38

kurzen Zeiten Blickschwankungen nur in äußerst beschränktem Maße sich geltend machen konnten.

Die Schwierigkeit, eine genaue Fixation einzuhalten, was auch frühere Autoren hervorheben, fand ich schon, als ich mit langdauern-

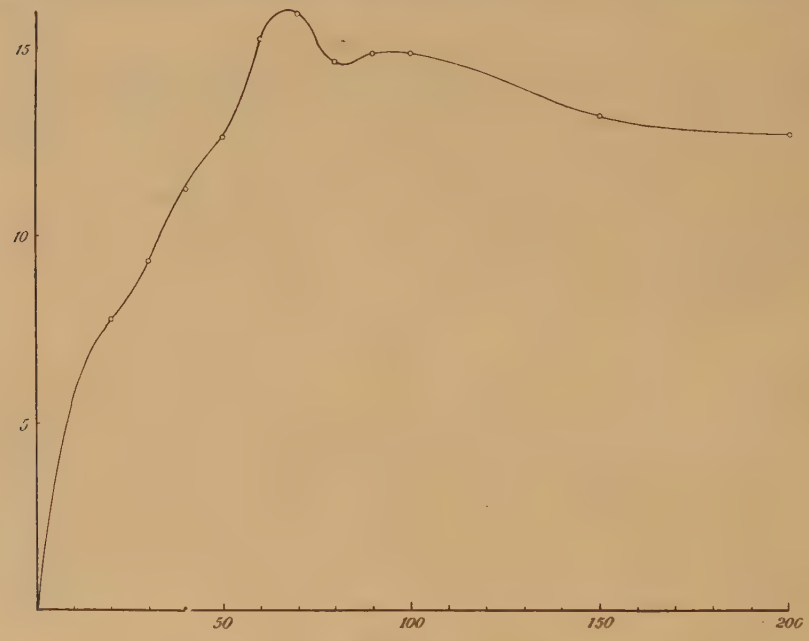

Fig. 11.

den Vergleichsreizen von 320^{σ} eine Anstiegskurve untersuchte. Die Felder liegen wieder übereinander und die Kurve zeigt denselben charakteristischen Verlauf für Helladaptation: Fig. 11. Er ist nicht wesentlich verschieden von dem der Dunkeladaptation, nur viel träger

Endergebnis.

Es fragt sich zunächst, ob die vorliegenden Untersuchungen mit denen andrer Autoren in Einklang stehen. Es kommen hier die Untersuchungen von Charpentier, Heß und Mc Dougall in Betracht, die mit bewegten Bildern arbeiteten. Charpentier und Mc Dougall verfolgen beide durch das Prinzip der rotierenden Scheiben den Vorgang im Sehorgan nach einer einmaligen sehr kurzen Reizung: Dabei finden sie einen ausgesprochenen oszillato-

rischen Verlauf des dem einmaligen momentanen Reize folgenden Eindruckes, indem abwechselnd helle und dunkle Streifen sichtbar werden. Zugleich kommt dort zum Ausdruck, daß dieses Phänomen des oszillatorischen Verlaufes eintritt bei jeder größeren plötzlichen Zustandsänderung; besonders ausgeprägt sein muß es demnach bei Dunkeladaptation und großen Helligkeiten.

Der Effekt einer solchen plötzlichen Zustandsänderung müßte sich nun auch wenigstens im Anfange des Verlaufs eines länger gebotenen Reizes als ein oszillatorischer Verlauf der Anstiegskurve zeigen. Einen solchen hat in der Tat bereits Heß (S. 1, a) bei Benutzung von bewegten Reizlichtern konstatiert: Das von ihm dort[1]) angegebene Schema für den Anstieg (Fig. 12) deckt sich vollständig mit dem

Fig. 12.

Grundzuge des in Fig. 7 angegebenen Verlaufes nach vorausgegangener Dunkeladaptation. Durch diese kam auch bei den sehr geringen Helligkeiten Fig. 6 der allgemeine schematische Verlauf zur Geltung. Der steile Abfall nach 120$^{\sigma}$ entspricht der tiefen Senkung im Heß-schen Schema und würde bei größeren Helligkeiten jedenfalls noch tiefer und in kürzerer Zeit nach Beginn der Reizung erfolgen. Die Erscheinung des oszillatorischen Verlaufs, wie sie Heß bei bewegten Reizlichtern findet, ist somit auch bei ruhenden Bildern festgestellt.

Überdies findet sich bei den vorliegenden Versuchen für Hell- und Dunkeladaptation außer jenen großen Hauptoszillationen, die wir auch bei Heß fanden, eine weitere ausgeprägte Schwingung, die im ganzen Verlaufe sicht zeigt und ungefähr dreimal so schnell wie die erwähnte Hauptschwingung erfolgt.

Ein solcher ausgesprochener oszillatorischer Verlauf steht völlig

---

[1]) Pflügers Archiv, Bd. 101, S. 250.

in Einklang mit den von Charpentier und Mc Dougall angegebenen Oszillationen nach einmaliger momentaner Reizung. Im vorliegenden Falle zeigt sich allerdings eine Abhängigkeit der Dauer der Schwingungen von der Intensität, die Charpentier nur innerhalb sehr enger Grenzen findet. Doch verwendete dieser stets große Helligkeiten, bei denen sich keine große Differenz in der Schwingungsdauer geltend machen konnte. Ob die Schwingungen Charpentiers mit der Hauptoszillation oder mit den kleinen übergelagerten Schwingungen identisch sind, läßt sich ohne exakte Helligkeitsangabe nicht entscheiden. Entsprechen, wie ich vermute, die Schwingungen Charpentiers der Hauptoszillation, so wären die kleinen Schwingungen diejenigen, die er zur Vervollständigung seiner Theorie sucht (Arch. de phys. norm. et path. 1896: Nouvelles recherches sur les oscillations rétiniennes).

Was den Streit zwischen Exner und Heß anbelangt, so möchte ich dazu folgendes bemerken: Der von Exner verlangte Nachweis, daß der durch Heß bei bewegten Bildern festgestellte oszillatorische Verlauf auch bei ruhenden Bildern stattfinde, ist durch die vorliegenden Untersuchungen geliefert. Aber aus einer solchen einzigen Anstiegskurve auf einen Widerspruch mit dem Talbotschen Gesetz zu schließen, ist ganz unstatthaft; denn die hier auftretende plötzliche Zustandsänderung ist nicht zu vergleichen mit dem Totaleffekt, der bei rotierenden Scheiben erreicht wird. Wenn Heß dagegen vermutet, daß die Hauptschwingung in bedeutend kürzerer Zeit als bei Exner erfolgt, der das Maximum seiner Intensität bei 166^{σ} findet und dessen Kurve als ganz falsch bezeichnet, so geht er auch zu weit; denn es ist sicher, daß bei geringen Helligkeiten das Maximum sehr weit hinausrückt. Zu vermissen ist allerdings in der Exnerschen Arbeit eine Angabe über die Adaptationsverhältnisse. Eine größere Annäherung an die Exnersche Kurve zeigen dagegen die bei Helladaptation gefundenen Kurven (z. B. Fig. 11). Daß kurz nach dem Maximum ein geringer, aber ziemlich steiler Abfall erfolgt, hat Exner deshalb übersehen, weil er das Maximum bei 166^{σ}, den nächsten Punkt seiner Kurve aber erst bei 360^{σ} beobachtet. Es mußten ihm dadurch die dazwischenliegenden oszillatorischen Vorgänge entgehen. Exner rundet das Maximum seiner Kurve auf 200^{σ} ab, während er es bei 166^{σ} beobachtet. Der Knick, der ohne diese Abrundung sich

ergeben hätte, stände dann mit dem plötzlichen Sinken der Kurve, das ihm jedoch entgehen mußte, völlig im Einklang. Weiterhin fällt die Kurve langsam ab, und ebenso stimmt der Anstieg, abgesehen von den Schwingungen, mit dem von Exner skizzierten annähernd überein, obgleich er seine Kurve unter andern Voraussetzungen konstruiert hat; doch würde dies nur eine geringe Veränderung in der Höhe der Ordinaten mit sich bringen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse für Dunkel- und Helladaptation läßt sich schließlich über die Niveaufläche der Helligkeitserregung folgendes sagen:

Auf dem angegebenen Querschnitte (das ist für eine bestimmte Intensität) steigt aus der Nullage, der vollständigen Dunkeladaptation, die Helligkeitserregung wellenförmig an bis zu ihrem Maximum, dann folgen ein oder mehrere, zuerst tiefere, dann flacher werdende Täler, bis diese Wellen in ein ziemlich ebenes Stück, das sich in geringem Maße senkt, übergehen. Wie ich von der Nullebene, der Dunkeladaptation, ansteige, so kann ich auch von einer bestimmten Adaptationslage ausgehen. Ich stelle diese wieder als eine Ebene dar und setze eine zweite Helligkeit auf; dann erfolgt deren Anstieg in genau derselben Art und Weise wie ein Anstieg aus der Nullage, nur sind die Täler nicht so tief eingeschnitten. Erwähnen muß ich noch, daß das analoge Problem, von einer bestimmten Helladaptationslage ausgehend den Abfall, d. h. den Verlauf der Erregung bei einer plötzlichen Verdunkelung, zu verfolgen, in derselben Art und Weise untersucht werden kann.

Wie sich aber die absoluten Höhen in dieser Niveaufläche der Helligkeitserregung verhalten, das ist Sache des psychophysischen Problems.

Eine Veranschaulichung und Nachprüfung meiner Resultate, die zugleich ein Stück aus dieser Niveaufläche vorführt, ließ sich auf die folgende Art erreichen:

Der erwähnte Sektor des Pendeltachistoskops wurde in nebenstehender Form gearbeitet: Fig. 13. Er schwang vor einem 1 cm breiten, 3 cm langen, gleichmäßig hellen Felde in der angegebenen Richtung und bot so die verschiedenen Zonen des Feldes verschieden lange. Es bewegte sich scheinbar die Helligkeit des Feldes von oben

nach unten, bis schließlich beim Vorbeigehen der Kante k das ganze Feld plötzlich abgeschnitten wurde, und zwar war die oberste Zone 270^{σ} erhellt, jede tiefer liegende Zone eine geringere Zeit bis zur

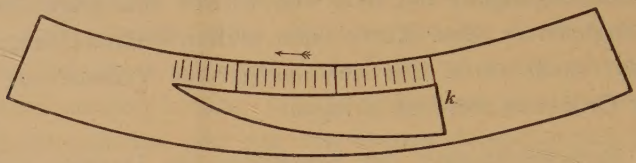

Fig. 13.

Grenze o herunter. Dieses Feld würde den Streifen parallel zur x-Achse aus der Niveaufläche (Fig. 1) herausgreifen, also den Anstieg der betreffenden Intensität bis 270^{σ} veranschaulichen. Dabei zeigte es sich, daß, wie zu erwarten war, das Feld nicht gleichmäßig hell erschien, vielmehr stieg die Helligkeit langsam an und erreichte ihr Maximum, welches sich bei größeren Intensitäten deutlich nach unten verschob. Bei Dunkeladaptation war ganz deutlich, bei Helladaptation in geringerem Maße ein dunkler Querstreifen kurz hinter dem Maximum zu sehen. Auch im Anstieg bis zum Maximum waren bei Dunkeladaptation Unregelmäßigkeiten zu erkennen, die Schwingungen in der Anstiegskurve. So gibt uns also diese Methode eine Illustration der auch auf anderm Wege untersuchten Erregungsvorgänge.

Fig. 14.

Nochmals kurz zusammengefaßt, lieferte die vorliegende Untersuchung folgende Resultate:

1. Für die betreffenden Intensitäten wird unter Annahme des erwähnten Maßstabes der Anstieg durch die gezeichneten Kurven dargestellt.

2. Die Maximalzeiten sind sicher abhängig von den verwendeten Intensitäten, und zwar werden sie bei Hell- und Dunkeladaptation kleiner mit zunehmender Intensität.
3. Der Anstieg der Helligkeitserregung ist ausgezeichnet durch Oszillationsvorgänge, die hier zum erstenmal mit ruhenden Bildern nachgewiesen sind, und zwar finden sich Schwingungen in größerer Zahl als bisher bekannt. Die Oszillationen treten bei plötzlichen größeren Unterschieden der Beleuchtung hervor, besonders nach vorangegangener Dunkeladaptation.
4. Der Anstieg ist nicht gleichmäßig für alle Stellen der Netzhaut, vielmehr sind schon innerhalb geringer Grenzen bedeutende Differenzen zu finden.

Ich kann nicht schließen, ohne Herrn Geheimrat Wundt meinen Dank für die Anregung und Förderung dieser Arbeit auszusprechen; desgleichen danke ich meinen Versuchspersonen für ihre Hilfe, besonders auch Herrn Dr. Wirth für manchen guten Rat.

Vita.

Verfasser vorstehender Arbeit, Max Karl Büchner, wurde am 17. März 1882 in Dresden-Plauen geboren und ist ev.-luth. Konfession. Auf der dortigen höheren Volksschule vorgebildet, besuchte er von Ostern 1892 die Städtische Realschule zu Dresden-Johannstadt, die er nach Erlangung des Reifezeugnisses Ostern 1898 verließ. Darauf trat er in die Drei-König-Schule (Realgymnasium) zu Dresden-Neustadt über, besuchte die drei obersten Klassen dieser Anstalt und bestand Ostern 1901 die Maturitäts-Prüfung. Seitdem widmete er sich an der Universität Leipzig dem Studium der Mathematik, Physik, Chemie und Philosophie. Er besuchte die Vorlesungen der Herren Professoren und Dozenten

des Coudres, Engel, Felix, Hausdorff, Heinze, Hölder, Jungmann, Krueger, Liebmann, Mayer, Neumann, Volkelt, Wagner, Wiener, Wirth, Wislicenus, Woltereck, Wundt

und nahm Teil an den Seminaren und praktischen Übungen der Herren

Engel, Hausdorff, Lehmann, Liebmann, Mayer, Neumann, Wagner, Wiener, Wirth, Wundt.

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.